

高精度 GNSS を用いた自律移動草刈りロボットの開発

Development of Autonomous Mobile Mowing Robot Using High-Precision GNSS

○学 林 拓真 (九大) 大城孝弘 (OREC)
 渡邊 崇 (OREC) 下窪 竜 (OREC)
 小玉尚人 (OREC) 正 倉爪 亮 (九大)

Takuma HAYASHI, Kyushu University, t.hayashi@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Takahiro OHKI, OREC Corporation

Takashi WATANABE, OREC Corporation

Ryu SHITAKUBO, OREC Corporation

Naoto KODAMA, OREC Corporation

Ryo KURAZUME, Kyushu University

In this research, we develop an autonomous mowing robot in orchards using high-precision GNSS and a ROS architecture. The robot is equipped with two crawlers, a GNSS module and an antenna, and a 3D-LiDAR. As a high-precision GNSS, Network-RTK-GNSS and CLAS by Quasi-Zenith Satellite System, Michibiki, can be chosen depending on the situation. We investigate the positioning performance of Network-RTK-GNSS in some orchards including outdoor plantations and plastic greenhouses. Some demonstrations in outdoor environments including fallow fields were conducted by the developed autonomous mowing robot.

Key Words: Agricultural Robot, Autonomous Mobile Robot, High-Precision GNSS

1 緒言

人手不足などの社会問題の解決に向け、様々な分野でロボット導入による自動化への期待が高まっている。工場などではロボットを導入することで単純作業など 3K 労働を人からロボットに代替させ、人をより付加価値の高い作業に集中させる事例がある。一方、農業分野でも高齢化や後継者不足が顕著であり、自動化による人手不足解消が期待されている。

我々は、数多くある農作業の中でも除草作業に注目した。除草作業は農作物の生育や農場の管理のために必要不可欠であるが、多大な労力が必要で付加価値の低い作業である。そこで我々は、除草作業を自動化するために、屋外で自律移動する草刈りロボットの開発を行っている。

屋外でロボットを自律移動させるためには、ロボットの正確な位置を推定すること、動的に変化する環境を正しく認識して人に危害を加えないこと、目的地に向かって計画した経路通りに移動装置を制御することが求められる。特に、果樹園など木の枝葉にロボットが隠れてしまう環境での正確な位置推定は難しく、様々な研究が行われている [1, 2]。開発したロボットでは、これらの解決に向け、高精度で位置推定が可能なネットワーク型 RTK-GNSS、3D-LiDAR、ROS の Navigation Stack を用いる。

また、本稿では、開発したロボットの有効性を確認するために、果樹園でのネットワーク型 RTK-GNSS の精度計測、整地での自律移動実験、農地での自律移動実験を行った結果を報告する。

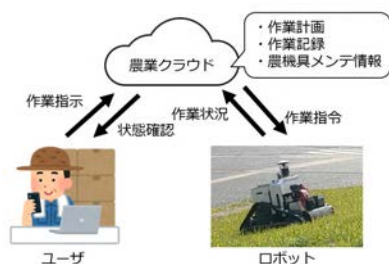


Fig.1 System concept

2 自律移動草刈りロボット

本研究では、ネットワーク型 RTK-GNSS を用いた自律移動草刈りロボットを開発した。システム全体の概略を図 1 に示す。ユーザはロボットに対して農業クラウドのアプリケーションを通して作業を指示し、ロボットの状態を確認できる。また、農業クラウドは作業計画・作業記録・農機具メンテ情報を処理する。さらに、クラウドはロボットに対して作業指令を出し、ロボットはクラウドに作業状況を送信する。

2.1 ハードウェア構成

ロボットのハードウェア構成を図 2~6 に示す。



Fig.2 Right side Fig.3 Front side Fig.4 Left side



Fig.5 Back side



Fig.6 Upper side

ロボットの左右にそれぞれ独立した三角形のクローラを搭載し、それぞれ駆動用モータにより駆動する。前方に 2 サイクルエンジン、発電用モータ、下部に草刈り用の刃を搭載し、エンジ

ンの動力を用いて発電用モータと草刈り用の刃を回転させる。発電用モータで発電した電気は後方に搭載している 24 V の駆動用バッテリーに充電される。また、エンジン等が計測の邪魔にならない高さに 3D-LiDAR を搭載し、電波ができる限り遮蔽されない最上部に GNSS アンテナを搭載する。さらに、駆動用バッテリー上部のボックス内に駆動用モータ制御基板、メインコンピュータ、GNSS 受信機、Wi-Fi ルータ、LTE ルータを搭載する。メインコンピュータ等は右側に搭載したモバイル電源から給電する。

2.2 ソフトウェア構成

ロボット制御ソフトウェアは ROS melodic を用いて実装した。ROS を用いた開発では、オープンソースで多数公開されているパッケージを組み合わせて使用することで、それぞれのロボットのためのコーディング作業を減らし、パラメータ調整のみで複数のロボットに対応できるため、開発ペースを向上できる。

2.3 CAN によるクローラー制御

左右の 2 つのモータの回転数を制御するモータ制御基板 = メインコンピュータ間のインタフェースは CAN で実装した。モータは正回転と逆回転のそれぞれについて 1 速, 2 速, ..., 5 速と段階的に回転数を調節でき、メインコンピュータから CAN バスに左右それぞれのモータの目標回転数を指令し、モータを回転させる。また、モータからはモータの回転速度 (rpm) と回転方向が送信される。

ROS のトピックと CAN メッセージを変換する ROS パッケージ “socketcan_interface” を利用して、メインコンピュータ = モータ制御基板間の CAN メッセージの送受信を行う。ROS の移動速度指令トピック “cmd_vel” は並進速度と回頭速度で構成されており、差動二輪ロボットの逆運動学より左右のモータに必要な回転速度を求め、モータへ指令する。また、回転中のモータから得られる左右のモータの回転速度から、差動二輪ロボットの運動学を用いてロボットの並進速度と回頭速度を推定し、ホイールオドメトリとする。

2.4 高精度 GNSS を用いた位置推定

ロボットの自己位置推定のために、誤差数 cm で測位が可能な高精度 GNSS であるネットワーク型 RTK-GNSS[3] および準天頂衛星みちびきを用いた CLAS (Centimeter Level Augmentation Service) を使用する。具体的には、GNSS モジュールとアンテナは Magellan Systems Japan 社の多周波マルチ GNSS 受信モジュールと受信アンテナを使用し、ネットワーク型 RTK-GNSS では docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービスを利用する。

従来の GNSS による測位手法は単独測位といい、約 10 m の測位誤差がある。また、RTK-GNSS の解析の過程で得られる解を FLOAT 解といい、約 20 cm の測位誤差がある。さらに、解析の結果得られる高精度な解を FIX 解といい、約 5 cm 以下の測位誤差で測位できる。

GNSS はアンテナ上部が開けている環境で使用することで多くの衛星を捉え、正確な測位が可能である。しかし、草刈りロボットを使用するフィールドは、枝葉がロボット上部を覆う果樹園であるため、GNSS のアンテナ上部が開けているとは限らず、GNSS のみに依存しない位置推定手法を考えなければならない。

そこで、GNSS の測位データと、クローラのホイールオドメトリのデータを拡張カルマンフィルタ [4] に入力し、GNSS の測位結果の尤度が下がったときにホイールオドメトリによって推定位置を補正する。拡張カルマンフィルタの ROS パッケージとして、“robot_localization” を利用する。

2.5 障害物検知

ロボットはあらかじめ登録されたマップに従って自律移動を行うが、農園内にマップ作成時には存在しなかった物が置かれていたり、人が他の作業をしている可能性があるため、危害を加えないように、これらを検知する必要がある。

そこで、ロボットに搭載された 3D-LiDAR を用いて障害物検知を行う。使用した 3D-LiDAR は Quanergy Systems 社製 M8 である。鉛直方向に 8 つ LiDAR を搭載し、水平方向は 360 deg 測定可能で角度分解能は 0.03 deg である (図 7, 8)。



Fig.7 Real image

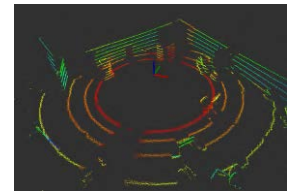


Fig.8 Point cloud

ROS で経路計画を行うためのマップは 2 次元であるため、3 次元点群をそのまま障害物としてマップに反映することはできない。また、レーザが床に当たって反射する場合は床を障害物として認識してしまう。そこで、取得した 3 次元点群データのうち、使用する高さの範囲を指定し 2 次元に落とし込むことで、マップ作成時には存在しなかった障害物や人などをリアルタイムにマップに反映できる。

2.6 移動計画

ROS の Navigation Stack を利用し、ロボットを自律移動させる。環境地図 (図 9)、センサの出力、ロボットの現在の位置姿勢、目標位置姿勢を入力する。まず、環境地図と 3D-LiDAR のデータからコストマップ (図 10) を計算する。次に、ダイクストラ法を用いてグローバルパスを計算し、さらに、Dynamic Window Approach[5] を用いてローカルパスを計算する。最後にローカルパスをもとに、ロボットの移動速度指令を出力する。



Fig.9 Default map

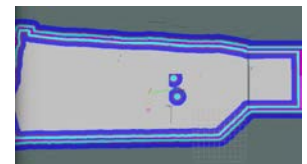


Fig.10 Cost map

ROS の Navigation Stack を利用することで 1 つの目標位置姿勢に到達できるが、草刈りロボットは 1 つの目標位置姿勢まで最短で移動するだけでなく、農園内を隈なく走行する必要がある。そこで、複数の目標位置を一括で登録し 1 つずつ順番に Navigation Stack の目標位置姿勢を指定するノード “navigation_manager” を開発した。

Navigation Stack から出力されるステータスから目標位置姿勢に到達したことを検知し、次の目標位置姿勢を指定することで複数目標位置に自律移動できる。また、移動の一時停止、移動再開、移動停止の機能も実装した。一時停止指令を受けると Navigation Stack の目標位置姿勢をキャンセルし、移動再開指令を受けると再び同じ目標位置姿勢を指定する。

複数目標位置を指定するために、Google マップの航空写真を利用した可視化ツール “mapviz” (図 11) を使用する。ただし、mapviz 用のプラグインを開発し、指定した複数目標位置への移動開始、移動停止、草刈り開始、草刈り停止のトピックを送信する機能や、移動経路を可視化する機能を実装した。また、AWS 上に ROS クラウド化ツール Rowma を利用した Web サーバを構築し、開発した mapviz 用プラグインと同じ機能を Web ブラウザから使用できる可視化ツール (図 12) も開発している。

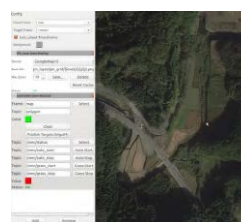


Fig.11 mapviz



Fig.12 AWS Rowma UI

3 実験

開発したロボットがネットワーク型 RTK-GNSS を使って自律移動できるかを確認するために以下の実験を行った。

3.1 果樹園での GNSS 測位精度測定

ロボットが草刈りを行うフィールドである果樹園でネットワーク型 RTK-GNSS の測位精度を測定した。具体的には、福岡県広川町と久留米市にある 9 つの農園で計 13 回の計測を行った。実験では、GNSS アンテナを頭上に掲げて農園内を歩いて取得したデータから、移動軌跡、FIX/FLOAT/単独測位の割合 (表 1)、補足衛星数を解析した。

図 13~図 25 は各実験で取得した移動軌跡である。青の点は FIX、緑の点は FLOAT、赤の点は単独測位の精度を示している。

実験の結果から、枝葉が茂っていない地点 (A, D, I)、ビニールハウスがない農園 (A, B, D, I)、ビニールハウスや棚の骨組みが疎な農園 (C, F) では FIX 率が高く高精度な測位が可能であるが、茂っている枝葉の下 (A, I)、防風林や建物などが近くにあり上空が見渡せない地点 (D)、ビニールハウスや棚の骨組みが密な農園 (E, G, H) では単独測位となることが多く、測位精度が下がることが分かった。

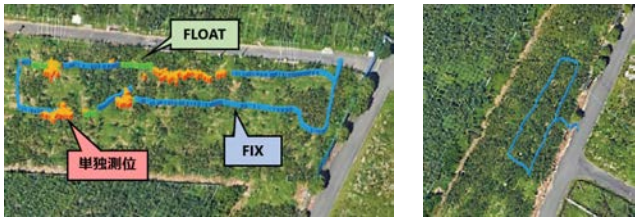


Fig.13 Orchard A



Fig.14 Orchard B



Fig.15 Orchard C



Fig.16 Orchard D(1)



Fig.17 Orchard D(2)



Fig.18 Orchard E



Fig.19 Orchard F

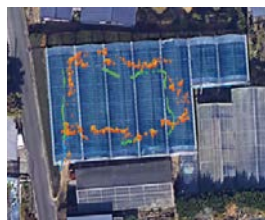


Fig.20 Orchard G(1)

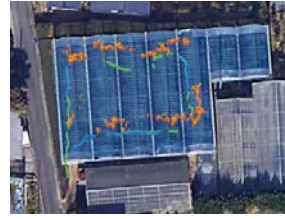


Fig.21 Orchard G(2)

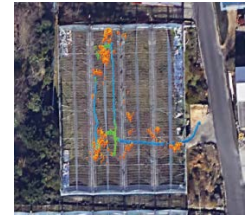


Fig.22 Orchard H



Fig.23 Orchard I(1)



Fig.24 Orchard I(2)



Fig.25 Orchard I(3)

Table 1 Precision rate [%]

実験番号	FIX	FLOAT	単独測位	測位不可
A	67.0	10.0	23.0	0.0
B	100.0	0.0	0.0	0.0
C	79.3	17.3	3.4	0.0
D1	66.5	7.0	15.6	10.9
D2	35.7	16.5	40.5	7.3
E	31.2	9.8	55.4	3.6
F	98.3	0.0	1.7	0.0
G1	28.2	25.8	46.0	0.0
G2	28.6	43.5	27.9	0.0
H	28.46	58.35	11.92	1.27
I1	46.06	51.55	2.39	0.00
I2	37.513	57.544	4.943	0.000
I3	96.0	0.2	3.8	0.0

3.2 整地での自律移動

九州大学伊都キャンパス構内の駐車場で、開発したロボットの動作確認を行った。(図 26)

まず、航空写真を利用して四角形の走行軌跡を描くように複数目標位置を指定し、移動開始できることを確認した。次に、高精度 GNSS とホイールオドメトリを組み合わせて位置推定を行い、計算した経路通りに移動できることを確認した。また、想定ルート上に設置した赤パイロンを 3D-LiDAR で検知し、回避する経路を再計算し、衝突せずに目標位置に移動できることを確認した。さらに、目標位置に到達後、次の目標地点に向けての移動を開始し、最後の目標位置に到達後、停止できることを確認した。

3.3 屋外農地環境での動作確認

福岡県広川町にある休耕田にて、開発したロボットの動作確認を行った。(図 27)

背の高い草が生えている休耕田でロボットに取り付けた草刈り刃を回転させながらロボットを自律移動させた。まず、停止している状態で草刈り場を回転させた。次に整地での実験と同様に、航空写真を利用して四角形の走行軌跡を描くように複数目標位置を指定し、移動開始できることを確認した。また、高精度 GNSS とホイールオドメトリを組み合わせて位置推定を行い、計算した経路通りに移動できること、目標位置に到達後、次の目標地点に向けての移動を開始し、最後の目標位置に到達後、停止できることを確認した。さらに、不整地においても搭載したクローラーで走行でき、走行した経路上の草を刈り取れることを確認した。

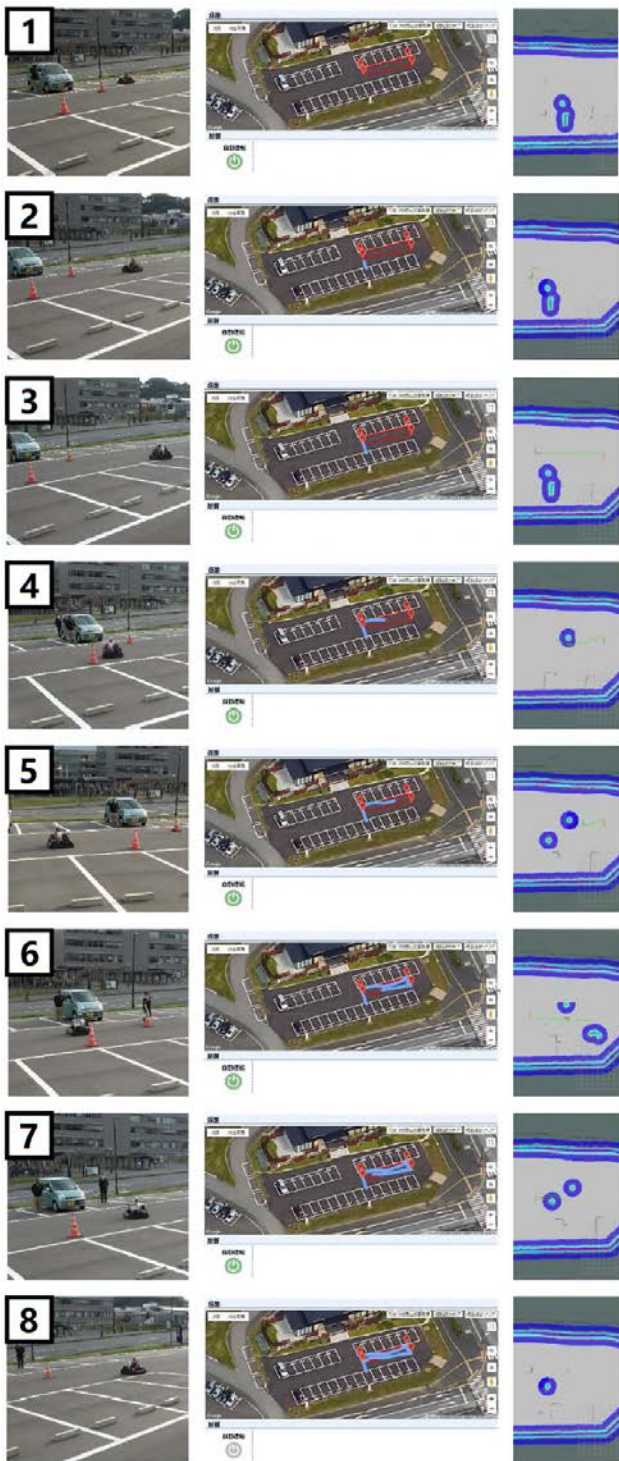


Fig.26 Automatic moving experiment in parking lot

4 まとめと今後の課題

農業分野の人手不足解消と生産性向上を目指し、自律移動草刈りロボットを開発した。ロボットに高精度 GNSS を搭載することで、基地局を設置する手間なく誤差数 cm の高精度位置推定を実現した。また、3D-LiDAR を搭載することで障害物を検知可能になり、動的な環境での安全な自律移動を実現した。さらに、航空写真を利用して複数の目標位置を一度に設定することで、最短経路での移動だけでなくユーザが指定した経路での自律移動を実現した。最後に、ネットワーク型 RTK-GNSS の測位精度測定実験、整地での自律移動実験、農地での草刈り実験を行った。



Fig.27 Automatic mowing experiment in fallow field

今後は、ソフトウェアの ROS2 化、3D-LiDAR での草と人などの障害物を見分ける機能の実装、範囲を指定するだけで範囲内を隈なく走行するルートを自動で計画する機能の実装を行い、改良したロボットで果樹園での実証実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人: NEDO) によって実施されました。

参考文献

- [1] Omer Shalev, and Amir Degani, "Canopy-Based Monte Carlo Localization in Orchards Using Top-View Imagery", IEEE Robotics and Automation Letter, Vol. 5, Issue 2, pp. 2403-2410, 2020
- [2] Steven W. Chen, Guilhermr V. Nardari, Elijah S. Lee, Chao Qu, Xu Liu, Roseli A. F. Romero, and Vijay Kumar, "SLOAM: Semantic Lidar Odometry and Mapping for Forest Inventory", IEEE Robotics and Automation Letter, Vol.5, Issue 2, pp. 612-619, 2020
- [3] 高須知二, "RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術", GPS/GNSS Symposium, Vol. 2007, pp.267-278, 2007
- [4] Moore Thomas and Daniel Stouch, "A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System", Intelligent autonomous systems 13, Springer, Cham, pp. 335-348, 2016
- [5] Fox Dieter, Burgard Wolfram, and Thrun Sebastian, "The dynamic window approach to collision avoidance", IEEE Robotics & Automation Magazine, 4(1):23-33, 1997